

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

A Study on Complexity Reduction of the Reliability-Based
Maximum Likelihood Decoding Algorithm for Block Codes

ブロック符号に対する置換生成行列を用いた
最尤復号アルゴリズムの計算量低減に関する研究

申請者

八木 秀樹

Hideki Yagi

経営システム工学専攻 情報数理応用研究

2005 年 12 月

近年の情報化社会において、その基盤を支える計算機技術と情報通信技術の果たす役割は、ますます大きくなっている。両者は特に、最近のインターネットやマルチメディアプラットフォームなどの目覚ましい発展に貢献している。情報通信技術では、計算機間通信、移動体通信、深宇宙通信、衛星通信などに新しい方式が提案され、多くは標準化作業を経て新しい技術が普及する。そのため、この分野の研究成果は長年にわたり蓄積されており、新しいニーズに対して蓄積された研究成果の中から技術として確立したものが採用され、実用化される。このような情報システムを構成する機器を開発・設計するため、数多くの情報数理や情報工学が寄与している。誤り訂正符号の理論、すなわち符号理論も情報数理の重要な一分野である。

符号理論では符号化操作により情報系列に冗長性を付加し、伝送中に生じた情報の誤りを訂正する。そのために、符号長 n 、情報記号数 k 、最小距離 d の (n, k, d) 符号を構成する。符号理論の研究対象の1つは、与えられた n, k のもとで、より大きな d をもつ符号化方法を見出すことである。他の研究対象には、 (n, k, d) 符号をなるべく少ない計算量で、より小さな復号誤り確率を達成するような復号アルゴリズムの開発がある。本論文は後者の立場から新しい復号法を提案している。

符号化・復号法は本来組み合わせて用いられるべきものである。多くの場合、符号化は世界的な標準化作業によりその規格が定まるが、同じ符号に対し復号法は工夫の余地が大きく残されている。例えば、音楽用 CD (Compact Disk) や DVD (Digital Versatile Disk) は、それぞれ標準化された単一の誤り訂正符号により符号化された媒体が市場に出されるが、これから元のデータを復元する CD・DVD プレーヤに単一の復号アルゴリズムを用いる必要はない。また、地球から電波が到達するのに数十分かかかる惑星探査衛星などの深宇宙通信では、最適な符号化法を選びつつ、劣悪な通信路に送り出された符号語を最大限の努力を払って復号しなければならない。すなわち、同じ符号化法でも復号器を高性能化すれば良い性能を引き出すことができる。

長さ k の情報系列が全て等確率で発生するとき、最尤復号法は復号誤り確率を最小にする復号法である。最尤復号法は最適な復号法ではあるが、実行する際には基本的に符号が持つ全ての符号語の尤度を比較しなければならず、その計算量が大きな問題となる。特に、誤り訂正符号の中で重要なクラスである線形ブロック符号に注目したとき、その実行はかなりの計算時間とメモリ量を必要とする。そこで従来より、雑音の発生が符号語のシンボルごとに独立な無記憶通信路において、効率的に最尤復号を実行できるアルゴリズムを開発する研究が盛んに行われている。この分野の数多くの研究は、以下の手法のいずれかに分類される。

- (A) 線形ブロック符号のトレリスダイアグラムを利用する手法。
- (B) 受信系列から計算されるシンボルの信頼度の順序に応じて符号語のシンボル位置を置換し推定誤りパターンを加え、繰り返し代数的復号を行うことにより候補となる符号語を複数生成する手法。
- (C) 受信系列から計算されるシンボルの信頼度の順序に応じて生成行列を列置換して候補となる符号語を繰り返し生成する手法。
- (D) その他、リスト復号など。

上記の手法のうち、(A)、(B) の復号法は符号の幾何的構造・代数的構造を巧みに利用

しており、簡潔な幾何的・代数的構造を持たない広いクラスの線形ブロック符号に対して用いることは困難である。一方、(C)のシンボルの信頼度の順序に列置換した生成行列（以降、置換生成行列と呼ぶ）を用いて候補となる符号語を繰り返し生成する手法は、一般の2元線形ブロック符号に対する効率的な復号法として近年注目を集めている。この手法は、受信系列から計算される長さ k の仮の情報系列（以降、テスト系列と呼ぶ）を逐次的に生成し、置換生成行列に掛け合わせることによって効率的に候補符号語を生成する復号法である。この手法は、特に中程度から高いSN比の通信路においてその効果を発揮するが、一方で低いSN比の劣悪な通信路における復号計算量は依然として問題となっている。

本研究では(C)置換生成行列を用いて最尤復号を実行する復号法に対して、復号誤り率が劣化することなく、計算量を減少できる復号アルゴリズムを提案している。また、提案した復号アルゴリズムの計算量が必ず低減できることを証明し、同時にシミュレーションにより計算量がどれほどにとどまるかを明らかにしている。

以下に本論文の各章の概要を述べる。

第1章「Introduction」においては、本研究の背景と目的を明らかにし、研究の概要や特徴について述べている。

第2章「Preliminary」においては、情報・通信システムのモデルや誤り訂正符号の符号化・復号化の原理について述べている。また、以下の各章で共通となる定義や従来復号法について記している。

第3章「Improved Methods of Reliability-Based MLD Algorithm Using an Order Relation among Binary Vectors」では、従来提案された置換生成行列を用いた手法に共通する、候補符号語の尤度計算にかかる実数演算量を低減する手法について述べている。この章では、まず2元系列の半順序関係を定義し、この順序関係によって与えられた候補符号語の尤度を大まかに測ることができることを示している。また、新たに生成された候補符号語と既に得られている最も尤度が大きい符号語の順序関係を調べることによって、不必要な尤度計算ステップが省略でき、実数演算量の低減を達成している。その際、2元系列間の順序関係を調べる計算量は無視できる程度であることを示し、提案した手法の有効性を示している。ここで提案したアルゴリズムは置換生成行列を用いた最尤復号法という枠組みに属する全ての復号法に適用でき、その結果は有効性の点から高く評価できる。

第4章「Complexity Reduction of the Gazelle and Snyders MLD Algorithm」では、予め効率的な符号語の探索順序を定めている Gazelle-Snyders の手法を利用し、候補符号語を求める計算量を低減する手法について述べている。Gazelle-Snyders 法を解析した結果、連続して生成されるテスト系列に注目したとき、それらの Hamming 距離が比較的小さいことが示される。そこで、差分符号化の考えを用いて、以前に生成された候補符号語に2元演算を施すことにより、求めたい符号語を高速に生成する手法を提案している。その結果、メモリ量の大きな増加は伴わずにその主要な計算量である2元演算回数を大幅に低減できることを示している。したがって、3章で提案した手法と組み合わせることにより、実数演算量と2元演算量の両者を低減できるため、その価値は高い。

第5章「Improved Methods for Priority-First MLD Algorithms」では、評価関数の値の小さい順に候補符号語を生成していくタイプの手法に対して、そのメモリ量と2元演算量を低減する手法について述べている。まず、従来提案されている主要な評価関数の性質を解析し、求められた性質を利用して、不必要なテスト系列を可能な限り生成しないアルゴリズムを提案している。これにより、従来から大きな問題点であると指摘されているメモリ量の大幅な削減が達成できる。また、差分符号化の考えを用いて、次の候補符号語を高速に生成する手法を提案している。ここで提案した2つのアルゴリズムを組み合わせることにより、従来手法よりもメモリ量を低減しつつ、その2元演算量を大幅に低減できる。本章で提案したアルゴリズムは、著名なY.S. Hanらの復号アルゴリズムだけでなく、従来の多くの復号法に対して適用できる。また、この手法も3章で提案した手法と組み合わせることにより、従来に比べてメモリ量を低減しつつ実数演算量と2元演算量の両者を低減でき、その有効性は高く評価できる。

最後に、第6章「Concluding Remarks and Future Improvements」において以上の結果をまとめ、結論を述べている。また、今後の課題と展望についても述べている。

以上を要するに、本研究は従来の様々なタイプの置換生成行列を用いた最尤復号法に対し、復号誤り確率を劣化させることなくその計算量を低減する手法を提案したものである。まず、従来の置換生成行列を用いた復号法に対し、不必要な尤度計算を回避し、復号にかかる実数演算量を低減する手法を提案している。次に、候補符号語の生成手順にGazelle-Snydersによって提案された手法を仮定したもとで、候補符号語の生成にかかる2元演算量の低減を保証する手法を提案している。さらに、候補符号語を評価関数の値順に生成する手法を仮定したもとで、メモリ量を増加させずに候補符号語の生成にかかる2元演算量を大幅に低減させる手法を提案している。本論文で提案した手法は必ず最尤復号を達成しつつ、従来の復号法の計算量を大幅に低減できる。その際、提案した手法の性能評価を解析的に行うと同時に、実験的にも行っており、両面から従来の手法に対する有効性が明確に示されている。その結果、理論と実際の狭間を埋め、将来的な実用化への大きな示唆を与えている。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。

2005年11月

審査員(主査)	早稲田大学教授	工学博士(大阪大学)	平澤 茂一
	早稲田大学教授		東 基衛
	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	大石 進一
	早稲田大学教授	工学博士(早稲田大学)	小松 尚久
	早稲田大学教授	博士(工学)早稲田大学	松嶋 敏泰